Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.383.51:537.874

Иванович
Владислав Дмитриевич

# Генерация терагерцового излучения в p-i-n структурах фемтосекундными лазерными импульсами

**АВТОРЕФЕРАТ**
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0717-01 «Нанотехнологии и наноматериалы»

_____

Научный руководитель
Малевич Виталий Леонидович
д. ф. -м.н, доцент

_____

Минск 2026

# КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение занимает промежуточное положение между микроволновым и инфракрасным диапазонами электромагнитного спектра и соответствует частотам приблизительно от 0,1 до 10 ТГц. Благодаря своим особенностям терагерцовое излучение представляет значительный интерес для научных исследований и практических приложений, включая спектроскопию, диагностику материалов и телекоммуникационные технологии.

Развитие фемтосекундной лазерной техники позволило реализовать эффективные методы генерации и регистрации ТГц импульсов. Одним из перспективных направлений является использование полупроводниковых структур, в которых генерация излучения обусловлена сверхбыстрой динамикой фотогенерированных носителей заряда.

Особый интерес представляют p-i-n структуры, в которых под действием фемтосекундного лазерного импульса формируется субпикосекундный фототок, являющийся источником терагерцового излучения. Наличие широкой собственной области и сильного электрического поля позволяет эффективно ускорять носители заряда и управлять параметрами генерируемого сигнала.

В связи с этим актуальной задачей является исследование процессов генерации терагерцового излучения в p-i-n диодах и определение влияния параметров структуры и условий возбуждения на характеристики формируемых ТГц импульсов.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Терагерцовый диапазон электромагнитного спектра представляет значительный интерес благодаря широким возможностям применения в спектроскопии, системах контроля, медицинской диагностике, телекоммуникациях и исследованиях сверхбыстрых процессов. Развитие фемтосекундной лазерной техники открыло возможности эффективной генерации и регистрации электромагнитных импульсов субпикосекундной длительности.

Одним из перспективных способов получения терагерцового излучения является использование полупроводниковых структур, в которых генерация ТГц импульсов обусловлена сверхбыстрой динамикой фотогенерированных носителей заряда. К числу таких структур относятся p-i-n диоды, в собственной области которых под действием внешнего электрического поля и фемтосекундного лазерного импульса формируется фототок, являющийся источником терагерцового излучения.

Актуальность работы определяется необходимостью исследования процессов генерации терагерцового излучения в полупроводниковых p-i-n структурах и влияния параметров структуры и условий возбуждения на характеристики генерируемых импульсов.

Целью работы является моделирование процессов генерации терагерцового излучения в полупроводниковом p-i-n диоде при воздействии фемтосекундного лазерного импульса. Для достижения поставленной цели разработана математическая модель генерации ТГц излучения, реализована программа численного моделирования на языке Fortran и проведено исследование влияния напряжения смещения, длительности возбуждающего импульса и концентрации фотогенерированных носителей заряда на характеристики генерируемого сигнала.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке и оптимизации полупроводниковых источников терагерцового излучения. Результаты работы опубликованы и представлены на научных конференциях. Основные положения и результаты исследования получены автором самостоятельно.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Работа посвящена исследованию процессов генерации терагерцового излучения в полупроводниковых структурах при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов.

В первой главе выполнен анализ основных методов генерации терагерцового излучения в полупроводниках при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. Рассмотрены основные методы генерации ТГц излучения, включая фотопроводящие антенны, генерацию встроенным поверхностным электрическим полем, фото-Дембероский механизм в узкозонных полупроводниках и генерацию по механизму нелинейного оптического выпрямления. Проанализированы физические процессы, лежащие в основе каждого из указанных механизмов, а также факторы, определяющие эффективность генерации.

Особое внимание уделено генерации терагерцового излучения в полупроводниковых *p-i-n* структурах. Рассмотрены процессы фотогенерации носителей заряда, их ускорения электрическим полем в i-области диода и формирования субпикосекундного фототока. Показана перспективность *p-i-n* диодов как источников ТГц излучения..

Во второй главе разработана математическая модель генерации терагерцового излучения в полупроводниковом *p-i-n* диоде при воздействии фемтосекундного лазерного импульса. В качестве основы использован подход,

основанный на уравнениях баланса импульса и энергии электронов, позволяющий описывать динамику фотогенерированных носителей заряда в сильных электрических полях.

Рассмотрены физические процессы, протекающие в структуре после воздействия лазерного импульса, включая фотогенерацию электронно-дырочных пар, ускорение носителей электрическим полем, энергетическую релаксацию электронов и экранирование внешнего поля фотогенерированными носителями. Для описания указанных процессов сформулирована система дифференциальных уравнений, связывающая изменение скорости электронов, их средней энергии и напряжённости электрического поля в *i*- области диода.

В модели учитывается распределение фотогенерированных носителей во времени, определяемое временной формой возбуждающего лазерного импульса. Плотность фототока рассчитывается как результат суммарного движения носителей заряда, а напряжённость генерируемого терагерцового поля определяется производной фототока по времени.

Для численного решения системы уравнений разработана программа на языке *Fortran* 77. Программа позволяет выполнять моделирование процессов генерации терагерцового излучения при различных значениях параметров структуры и условий возбуждения, а также проводить анализ влияния отдельных физических факторов на характеристики формируемого ТГц сигнала.

Перед проведением параметрических исследований была выполнена проверка применимости используемой модели. Результаты расчётов были сопоставлены с опубликованными результатами моделирования методом Монте–Карло. Получено хорошее согласие результатов с данными моделирования методом Монте–Карло.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования процессов генерации терагерцового излучения в полупроводниковом p-i-n диоде и выполнен анализ влияния основных параметров структуры и условий возбуждения на характеристики генерируемого сигнала.

Исследовано влияние внешнего напряжения смещения на параметры генерируемого терагерцового излучения. Расчёты проводились при напряжениях смещения 1,5 В, 2,37 В и 3,5 В. Установлено, что увеличение напряжения смещения приводит к росту амплитуды ТГц сигнала вследствие увеличения напряжённости электрического поля в i-области диода и более эффективного ускорения фотогенерированных носителей заряда.

Проведено исследование зависимости характеристик генерации от длительности возбуждающего лазерного импульса. Расчёты выполнялись для длительностей импульса 40, 80 и 120 фс. Установлено, что уменьшение длительности импульса приводит к увеличению амплитуды генерируемого ТГц

поля. Так, при уменьшении длительности импульса со 120 до 40 фс амплитуда положительного пика возрастает приблизительно с $2{,}9 \cdot 10^{17}$ до $4{,}8 \cdot 10^{17}$ отн. ед.

Также выполнен анализ влияния интенсивности оптического возбуждения, характеризуемой концентрацией фотогенерированных носителей заряда. Моделирование проводилось для концентраций $3 \cdot 10^{15}$, $6 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$. Показано, что увеличение концентрации носителей приводит к росту плотности фототока и соответствующему увеличению амплитуды генерируемого терагерцового излучения. При увеличении концентрации от $3 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$ амплитуда положительного пика возрастает приблизительно от $2 \cdot 10^{17}$ до $6{,}2 \cdot 10^{17}$ отн. ед.

Результаты моделирования показали, что наиболее эффективная генерация терагерцового излучения достигается при повышенных значениях напряжения смещения, малой длительности возбуждающего импульса и высокой концентрации фотогенерированных носителей заряда. Полученные зависимости позволяют определить направления оптимизации параметров полупроводниковых источников терагерцового излучения на основе p-i-n структур.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненной работы исследованы процессы генерации терагерцового излучения в полупроводниковых структурах, возбуждаемых фемтосекундными лазерными импульсами.

Разработана математическая модель генерации терагерцового излучения в полупроводниковом p-i-n диоде, Для реализации модели создана программа численного расчёта на языке Fortran 77, позволяющая исследовать влияние параметров структуры и условий возбуждения на характеристики генерируемого излучения.

В результате моделирования установлено, что увеличение напряжения смещения приводит к росту амплитуды терагерцового сигнала за счёт повышения напряжённости электрического поля в i-области диода и более эффективного ускорения фотогенерированных носителей заряда. Показано, что уменьшение длительности возбуждающего лазерного импульса способствует увеличению амплитуды генерируемого излучения вследствие более быстрого изменения фототока. Также установлено, что повышение концентрации фотогенерированных носителей приводит к увеличению плотности фототока и, как следствие, к росту амплитуды ТГц сигнала.

Полученные результаты подтверждают возможность эффективного управления параметрами терагерцового излучения посредством изменения напряжения смещения, длительности возбуждающего импульса и концентрации

фотогенерированных носителей заряда. Разработанная модель может быть использована при исследовании и оптимизации полупроводниковых источников ТГц излучения.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ


1. Иванович, В. Д. Генерация ТГц излучения в p-i-n структурах фемтосекундными лазерными импульсами / В. Д. Иванович ; науч. рук. В. Л. Малевич // 61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР : материалы конференции. – Минск : БГУИР, 2025. – С. 257–258.
2. Иванович, В. Д. Генерация терагерцовых электромагнитных импульсов в p-i-n диоде, возбуждаемом фемтосекундным лазерным излучением / В. Д. Иванович, В. Н. Трухин, В. Л. Малевич // Материалы 82-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета. – Минск : БГУ, 2025. – С. 244–248.